

WPŁYW POPIOŁÓW LOTNYCH ZE SPALANIA OSADÓW ŚCIEKOWYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ I MROZODPORNOŚĆ BETONÓW DROBNOZIARNISTYCH

Gabriela Rutkowska¹, Michał Iwaszko¹

¹ Katedra Inżynierii Budowlanej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: gabriela_rutkowska@sggw.pl

STRESZCZENIE

W Polsce według danych GUS w oczyszczalniach ścieków komunalnych w 2010 roku wytworzono 526 tys. Mg s.m. osadów ściekowych. Natomiast w Krajowym Programie Oczyszczania Ścieków Komunalnych przewiduje się, że ich ilość w 2015 roku wzrośnie do 662 tys. Mg s.m. Jest to efekt dynamicznej rozbudowy w Polsce sieci kanalizacyjnej. Jedną z możliwości zagospodarowania popiołów jest ich wykorzystanie do produkcji materiałów konstrukcyjnych, jakim jest beton zwykły. Takie rozwiązanie daje korzyści ekologiczne oraz ekonomiczne. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości ((konsystencji, wytrzymałości na ściskanie, zginanie po 28, 56 dniach dojrzewania, mrozoodporności) betonów drobnoziarnistych oraz betonów zawierających w swoim składzie różną zawartość popiołów lotnych pochodzących z termicznego przekształcenia komunalnych osadów ściekowych. Beton z dodatkiem popiołów lotnych wykonano w czterech partiach. W dwóch partiach dodawano popiół w ilości 15% i 20% masy cementu a w kolejnych dwóch zastępowano masę cementu popiołem w ilości 15% i 20%. Po wykonaniu badań stwierdzono, że wykorzystany dodatek poprawia zbadane właściwości betonu, a tym samym obniża jego koszty produkcji.

Słowa kluczowe: beton drobnoziarnisty, popiół lotny, mrozoodporność, wytrzymałość.

EFFECT OF FLY ASH FROM THE INCINERATION OF SEWAGE SLUDGE ON THE STRENGTH AND FROST RESISTANCE OF FINE-GRAINED CONCRETE

ABSTRACT

According to the data of Polish Central Statistical Office (GUS), 526 000 Mg. of sludge solids were produced in 2010 in Poland. Moreover, it is expected in the National Program of Municipal Wastes Treatment that the quantity of sludge in 2015 will grow till 662 000 Mg. of sludge solids. It is the effect of dynamic development of the sewerage system in Poland. One of the possibilities of the recycling such ashes is their application in the production of building materials, such as grained concrete. Such solution gives ecological and economical advantages. The paper presents the results of investigations of properties (consistency, compressive strength and tensile strength after 28 and 56 days of curing, frost) of grained concretes as well as the concretes containing various quantity of fly-ashes produced in the thermal recycling of municipal sludge. Concrete with addition of fly-ashes was produced in four versions. In the two ones, the quantity of ashes equal 15% and 20% of the cement mass was added and in the another two versions 15% and 20% mass of the cement was replaced by the ashes. After the investigations it was stated that the applied admixture improves the properties of the grained concrete, hence, reduces the costs of its production.

Keywords: grained concrete, fly ash, frost, durability.

WPROWADZENIE

Przed polityką krajową stoi narastający problem zahamowania degradującego wpływu odpadów komunalnych na środowisko naturalne. Ten degradujący wpływ jest efektem zwiększenia ilości ścieków komunalnych. W Krajowym

Programie Oczyszczania Ścieków Komunalnych [KPOŚK 2010] szacuje się, że w porównaniu z rokiem 2010 (dane GUS – 526 tyś. Mg s.m), ilość ścieków komunalnych w 2015 roku wzrośnie do 662 tyś. Mg s.m. Oznacza to, wzrost ilości osadów wymagających zagospodarowanie o 26%. Zgodnie z ustawą o odpadach z dnia 27 kwietnia

2001 roku powstające osady ściekowe należy zagospodarować w sposób przyjazny dla środowiska naturalnego [Ustawa 2001]. W celu zmniejszenia ilości osadów kierowanych na składowiska konieczne jest stosowanie instalacji termicznego przekształcania odpadów [Bień, Neczaj i in. 2011]. Powstające w tym procesie popioły lotne, należy poddać recyklingowi. Jedną z możliwości zagospodarowania tych popiołów jest ich wykorzystanie do produkcji betonu.

Beton to podstawowy materiał o wszechstronnym wykorzystaniu w wielu konstrukcjach budowlanych. To produkt, nie tylko bezpieczny i stabilny, gwarantujący stabilność i nośność danej konstrukcji, ale i zrównoważony. Jego skład i parametry należy każdorazowo dostosować do warunków środowiskowych obiektu, w jakich będzie pracował. Beton modyfikowany popiołem lotnym z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych jest przykładem betonu, który może być alternatywą dla betonów tradycyjnych.

Zastąpienie pewnej ilości cementu portlandzkiego popiołem lotnym przynosi korzyści ekologiczne i ekonomiczne. Popiół ten, będący odpadem, jest składnikiem tańszym niż wykorzystywany do produkcji cementu, klinkier portlandzki. Proces produkcji klinkieru wiąże się z wysoką emisją dwutlenku węgla (szacuje się, że na 1 kg wyprodukowanego klinkieru przypada emisja 1 kg CO₂) oraz dużym zużyciem energii, ponieważ w technologii produkcji cementu klinkier jest prażony w temperaturze 1450 °C. Wprowadzone przez Unię Europejską ograniczenia emisji dwutlenku węgla [Kępys 2013] zachęcają do badań nad materiałami nowej generacji zawierającymi mniejsze ilości klinkieru.

METODYKA

Celem badań było poznanie wpływu dodania popiołów lotnych pochodzących ze spalania osadów ściekowych w czasie sporządzania mieszanki betonowej betonu drobnoziarnistego na wytrzymałość na ściskanie po 28 i 56 dniach dojrzewania oraz mrozoodporność.

Procedury badawcze oraz projektowe zostały oparte na wytycznych zawartych w aktualnie obowiązujących, krajowych normach budowlanych. Badania zostały wykonane w Pracowni Procesów Fizycznych w Budownictwie Centrum Wodnego i Laboratorium Budowlanym Katedry Inżynierii Budowlanej Wydziału Budownictwa

i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie. W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano mieszanki betonowe (beton) klasy C25/30 o konsystencji plastycznej – S3. Mieszanki zaprojektowano przy użyciu metodologii obliczeniowej badań Wydziału Doświadczalnego Siatkobetonu Politechniki Warszawskiej, opartej na wyznaczeniu ziarna mediana na podstawie krzywej uziarnienia kruszywa. Do przygotowania próbek betonu wykorzystano kruszywo drobne naturalne oraz cement portlandzki 42,5 R o wysokiej dynamice osiągnięcia wytrzymałości wczesnej, popiół lotny pochodzący z termicznego przekształcania osadów ściekowych oraz wodę.

Zgodnie z obowiązującymi normami sprawdzono właściwości uzyskanej mieszanki betonowej: konsystencję metodą Vebe zgodnie z PN-EN 12350-3:2011, zawartość powietrza metodą ciśnieniową według PN-EN 12350-7:2001. Dla wykonanych prostopadłościennych próbek o wymiarach 40x40x160 mm zbadano następujące parametry: wytrzymałość na ściskanie według PN-EN 12390-3:2011 po 28 i 56 dniach dojrzewania, wytrzymałość na zginanie po 28 i 56 dniach dojrzewania według PN-EN 12390-5:2011, mrozoodporność po 25 cyklach zamrażania i rozmarzania. Wytrzymałość na ściskanie przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej hydraulicznej H011 Matest, wytrzymałość na zginanie w maszynie ZD40 oraz mrozoodporność w komorze ToRoPol.

Badania polegały na porównaniu wybranych właściwości betonów drobnoziarnistych bez dodatków oraz zawierających w swoim składzie popiół lotny pochodzących z termicznej przeróbki osadów ściekowych w różnych proporcjach masowych. Przygotowano pięć rodzajów próbek:

- bez popiołu lotnego (A1, A2) – tzw. próba kontrolna,
- z wymianą 15% cementu na popiół (B1, B2)
- z wymianą 20% cementu na popiół (C1, C2)
- z dodatkiem 15% popiołu do zakładanej ilości cementu (D1, D2),
- z dodatkiem 20% popiołu do zakładanej ilości cementu (E1, E2)
- gdzie: 1 – badanie po 28 dniach, 2 – badanie po 56 dniach dojrzewania.

MATERIAŁ

Popiół lotny do produkcji betonu zwykłego po raz pierwszy został wykorzystany w Stanach Zjednoczonych w latach trzydziestych XX wie-

ku [Wesche 1991]. W Polsce i Europie popioły lotne krzemionkowe pochodzące ze spalania węgla kamiennego mają szerokie zastosowanie w technologii betonu i cementu [Giergiczny 2013]. Użycie ich w składzie betonu i cementu wpływa na zmniejszenie ilości użytego klinkieru cementowego oraz kruszyw na wytworzenie betonu, co za tym idzie oszczędność naturalnych surowców i paliw kopalnych oraz ograniczenie zanieczyszczenia środowiska i emisji dwutlenku węgla [Deja i Antosiak 2012].

Ziarna popiołu lotnego mają najczęściej kształt kulisty, ale mogą być także nieregularne lub graniaste. Ich średnica jest zbliżona do uziarnienia cementu i waha się od 1 do 150 μm [Joshi R.C. i in. 1997]. Popioły zawierają około 80% szkła i charakteryzują się dużą miałkością. Biorąc pod uwagę właściwości chemiczne, popioły lotne zawierają najwięcej krzemionki, Al_2O_3 , Fe_2O_3 oraz CaO . Znacznie mniej jest MgO , Na_2O , SO_3 [ACI 1991].

Do badań wykorzystano popioły lotne z termicznego przekształcania osadów ściekowych pochodzących z Oczyszczalni Ścieków „Czajka” w Warszawie. Zawartość metali ciężkich w popiołach wykorzystanych do badań przedstawiono w tabeli 1.

WYNIKI BADAŃ

Zarówno w próbkach nie zawierających dodatków, jak i w próbkach z dodatkiem popiołów lotnych zachowano stały skład granulometryczny kruszywa – procentową zawartość poszczególnych frakcji (70% kruszywo frakcji 0–2 mm oraz 30% kruszywo frakcji 2–4 mm) [PN-EN 933-1: 2000]. Projekt stosu okruszowego przedstawiono na rysunku 1.

Na podstawie krzywej uziarnienia oznaczono wielkość ziarna:

$$d_m = d_j + \frac{d_k - d_j}{\sum k - \sum j} (0,5 - \sum j) =$$

$$= 1 + \frac{2-1}{0,7-0,465} (0,5 - 0,465) = 1,15 \text{ [mm]}$$

gdzie: d_k i d_j – wielkość minimalnych otworów sit, wśród których znajduje się otwór o poszukiwanej wielkości d_m , przy czym $d_k > d_j$,
 $\sum j$ – suma procentowa zawartość frakcji od 0 do j ,
 $\sum k$ – suma procentowa zawartość frakcji od 0 do k .

Skład mieszanki betonowej ustalono za pomocą wzorów na sumę absolutnych objętości składników oraz ze wzoru na wytrzymałość be-

Tabela 1. Zawartość metali ciężkich w popiołach lotnych wykorzystanych do badań [na podstawie materiałów z oczyszczalni „Czajka”]

Table 1. Content of heavy metals in the fly-ashes used for investigations [based on the materials obtained in the “Czajka” sewage treatment]

Oznaczany parametr	Jednostka	Metodyka badań	Wyniki badań		Dopuszczalne graniczne wartości [16]
			Zakres zmienn.	Średnia	
Sucha masa	%	PN-EN 14346:2011		99,5	–
Arsen (As)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	< 1,0	–	≤ 2
Bar (Ba)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	< 1,0	–	≤ 100
Kadm (Cd)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	< 0,13	–	≤ 1
Chrom (Cr)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	0,1	–	≤ 10
Miedź (Cu)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	< 0,25	–	≤ 50
Rtęć (Hg)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; KJ-I-5.4-170	< 0,005	–	$\leq 0,2$
Molibden (Mo)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174	4,52–6,32	5,32	≤ 10
Nikiel (Ni)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174		< 0,25	≤ 10
Ołów (Pb)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174		< 0,25	≤ 10
Antymon (Sb)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; KJ-I-5.4-170	< 0,02–0,28	< 0,02	$\leq 0,7$
Selen (Se)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; KJ-I-5.4-170	0,13–1,44	0,52	$\leq 0,5$
Cynk (Zn)	mg/kg s.m.	PN-EN 12457-4:2006; PN-EN ISO 11885:2009; KJ-I-5.4-174		< 1,0	≤ 50



Rys. 1. Krzywa uziarnienia dobranej kruszywa
Fig. 1. Grain size distribution curve for the selected aggregate

tonu. Recepturę poszczególnych zarobów przedstawiono w tabeli 2.

Gęstość mieszanki betonowej

Po przeprowadzeniu badania gęstości pozornej mieszanki według PN-EN 12350-6:2011 zauważono wzrost gęstości przy dodaniu 15% i 20% popiołów do mieszanki. Związane jest to z dużym rozdrobieniem popiołów, które uszczelniają mieszankę wypełniając puste przestrzenie. Przy wymianie cementu na popiół zachodzi niewielkie zmniejszenie gęstości pozornej w porównaniu do mieszanki kontrolnej.

Wyniki przeprowadzonych badań mieszanki betonowej przedstawiono w tabeli 3.

Pozorna zawartość powietrza

Zgodnie z normą PN-EN 12350-7:2011 badanie zawartości powietrza w mieszance betonowej przeprowadzono metodą ciśnieniową. Największa zawartość powietrza uzyskano dla mieszanki, w której zastąpiono cement popiołem lotnym w ilości 15%, najmniejszą dla mieszanki do której dodano 15% popiołu.

Konsystencja

Badanie konsystencji mieszanki betonowej wykonano zgodnie z PN-EN 12350-3: 2011 metodą Ve-Be. Podczas przeprowadzania badania konsystencji mieszanki betonowe założona konsystencja została uzyskana jedynie dla mieszanki

Tabela 2. Receptura mieszanki betonowej poszczególnych zarobów

Table 2. Concrete mix recipe for the individual batches

Oznaczenie partii	Masa cementu [kg]	Masa wody [kg]	Masa kruszywa [kg]	Masa popiołów [kg]
A1, A2	0,806	0,361	2,806	—
B1, B2	0,685	0,361	2,806	0,121
C1, C2	0,645	0,361	2,806	0,161
D1, D2	0,806	0,361	2,806	0,121
E1, E2	0,806	0,361	2,806	0,161

Tabela 3. Wyniki badań mieszanki dla poszczególnych partii

Table 3. Test results for the mixes in individual lots

Oznaczenie partii	Skład	Gęstość pozorna [kg/m ³]	Zawartość powietrza [%]	Konsystencja
A1; A2	Kontrolna	2203	7,01	plastyczna
B1; B2	Zastąpienie cementu popiołami 15%	2190	7,55	gęstoplastyczna
C1; C2	Zastąpienie cementu popiołami 20%	2195	7,34	gęstoplastyczna
D1; D2	+ 15% popiołów	2256	4,77	wilgotna
E1; E2	+ 20% popiołów	2229	5,91	wilgotna

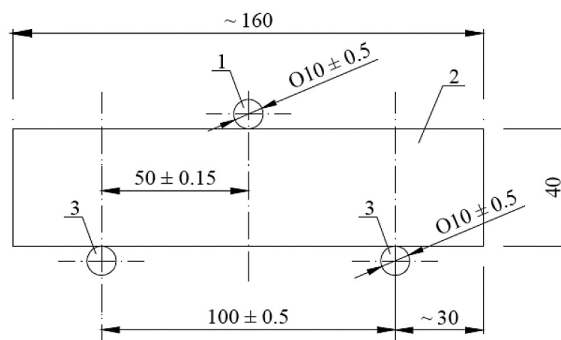
bez dodatków. Mieszanki w których zastąpiono cement popiołem uzyskały konsystencję gęsto-plastyczną, natomiast mieszanki do których dodano popiół w ilości 15 i 20% uzyskały konsystencję wilgotną. Przyczyną jest zapewne zwiększone zapotrzebowanie na wodę wywołane obecnością popiołów, które związały sporą ilość wody. Aby uzyskać konsystencję plastyczną w pozostałych mieszankach należałoby zwiększyć ilość wody zarobowej.

Wytrzymałość na zginanie betonu

Badanie wytrzymałości na zginanie przeprowadzono zgodnie z PN-EN 12390-5:2011. Badanie przeprowadzono na próbkach o wymiarach 40×40×160 mm wykorzystując aparat, o układzie łamiącym przedstawionym na rysunku 2 i 3.

Średnią wytrzymałość na zginanie po 28 i 56 dniach dla poszczególnych próbek przedstawiono w tabeli 4 oraz na rysunku 4. Wartość wytrzymałości na zginanie rośnie wraz z czasem dojrzewania betonu. Nie jest to jednak przyrost jednakowy dla wszystkich próbek. Zaobserwowano duży przyrost wytrzymałość na zginanie w próbkach kontrolnych (tzw. świadkach) wynoszący ponad 30%. W pozostałych beleczkach przyrost wytrzymałości jest zdecydowanie mniejszy. Najmniejszy przyrost wytrzymałości na zginanie występuje przy dodaniu 20% popiołów i wynosi on zaledwie 4,92%.

Wartość wytrzymałości na zginanie po 28 dniach jest największa dla betonu z dodatkiem 15% popiołów lotnych i wynosi 7,5 MPa. Jest ona większa od wytrzymałości świadków o 4,9%. Tendencja ta nie utrzymuje się już po 56 dniach dojrzewania, ponieważ wytrzymałość na zginanie próbki z dodatkiem 15% popiołów jest mniejsza



Rys. 2. Schemat układu łamiącego do badania wytrzymałości na zginanie: 1 – wałek obciążający, 2 – próbka, 3 – podpory

Fig. 2. Scheme of breaking set for bending strength tests: 1 – loading roller, 2 – sample, 3 – supports



Rys. 3. Zniszczenie próbki podczas badania wytrzymałości na zginanie

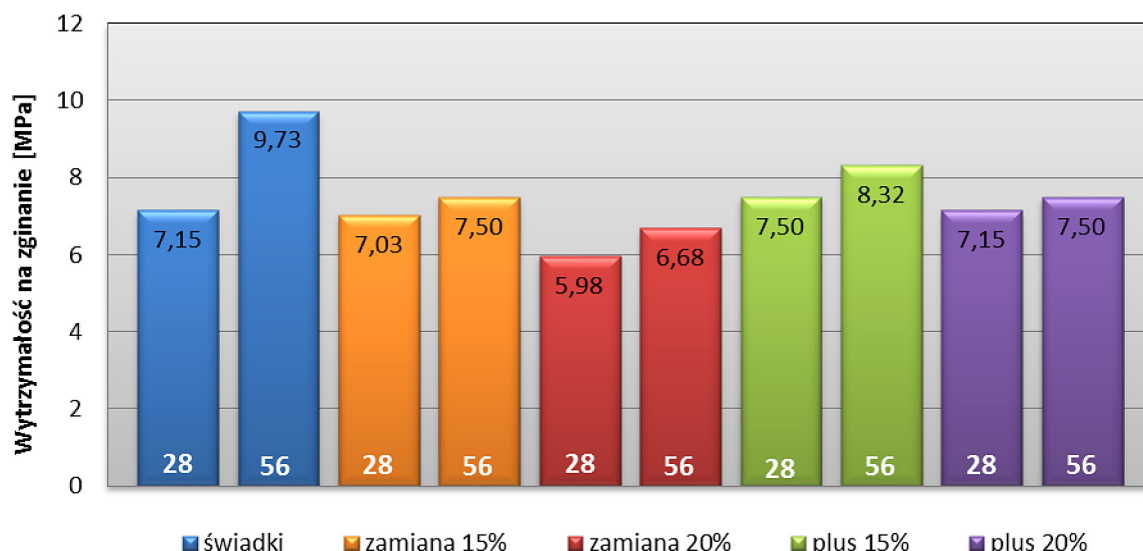
Fig. 3. Sample failure during bending strength tests

od świadków o 14%. Najniższą wytrzymałość wśród badanych próbek zarówno po 28 jak i 56 dniach miały te, w których zastąpiono 20% masy cementu popiołami.

Tabela 4. Wytrzymałość na zginanie próbek po 28 i 56 dniach

Table 4. Bending strength of the samples after 28 and 56 days

Partia	Wymiary [mm]			Masa [kg]	Gęstość [kg/m ³]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]				Przyrost wytrzymałości [%]
	a	b	c			po 28 dniach	po 56 dniach	średnia po 28 dniach	średnia po 56 dniach	
A1	160,11	40,07	40,98	0,585	2225,08	7,03	9,61	7,15	9,73	36,07
A2	159,92	40,2	40,26	0,59	2279,55	7,27	9,84			
B1	159,91	41,08	39,76	0,589	2255,08	7,03	7,50	7,03	7,50	6,67
B2	160,07	41,71	39,85	0,579	2176,21	7,03	7,50			
C1	159,57	41,76	40,09	0,593	2219,76	5,63	6,56	5,98	6,68	11,76
C2	159,7	40,95	39,79	0,581	2232,77	6,33	6,80			
D1	159,88	40,81	40,13	0,584	2230,40	7,50	8,20	7,50	8,32	10,94
D2	160,01	40,12	40,09	0,598	2323,58	7,50	8,44			
E1	160,02	40,09	40,11	0,591	2296,81	7,27	7,50	7,15	7,50	4,92
E2	160,01	40,07	41,02	0,593	2254,72	7,03	7,50			



Rys. 4. Średnia wytrzymałość na zginanie dla poszczególnych próbek po 28 i 56 dniach
 Fig. 4. Average bending strength for the individual samples after 28 and 56 days

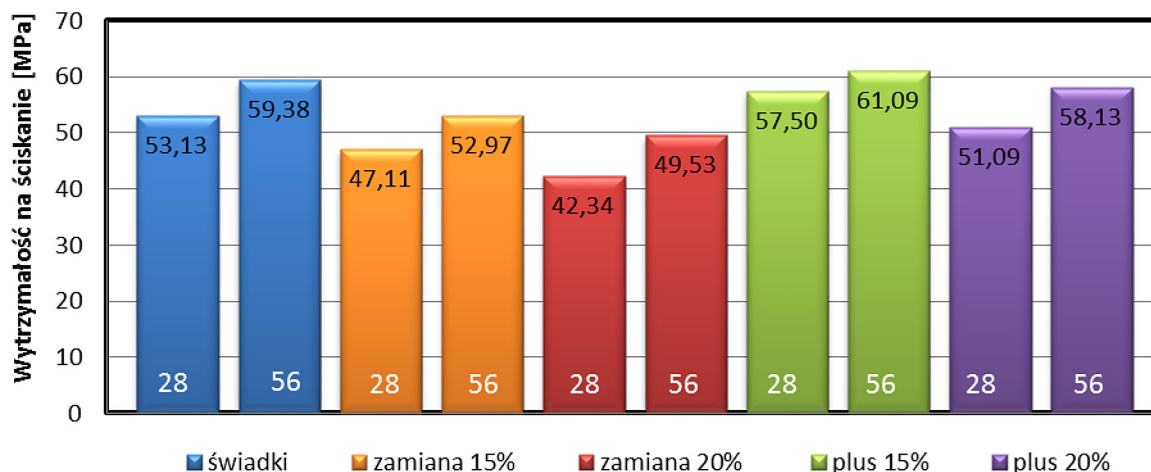
Wytrzymałość na ściskanie betonu

Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3: 2011, na połówkach beleczek w aparacie do ściskania (rys.5), który wstawiono do prasy. Uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w tabeli 5 i na rysunku 6.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że betony popiołowe w których dokonano zamiany z cementem charakteryzuje mniejsza wytrzymałość od betonów zwykłych. W rozpatrywanych próbkach zawartość popiołów stanowiła 15 i 20 procent masy cementu. W porównaniu do próbek porównawczych wyższą wytrzymałość zarówno po 28 jak i 56 dniach osiągnęły próbki z 15% dodatkiem popiołów.



Rys. 5. Aparat do wykonania badań na ściskanie
 Fig. 5. Apparatus for compression tests



Rys. 6. Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek po 28 i 56 dniach
 Fig. 6. Average compressive strength of the samples after 28 and 56 days

Tabela 5. Wytrzymałość na ściskanie dla poszczególnych próbek po 28 i 56 dniach**Table 5.** Compressive strength of the individual samples after 28 and 56 days

Partia	Wymiary [mm]			Masa [kg]	Gęstość [kg/m ³]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]				Przyrost wytrzymałości [%]
	a	b	c			po 28 dniach	po 56 dniach	średnia po 28 dniach	średnia po 56 dniach	
A1	160,06	41,16	40,29	0,59	2222,78	53,44	60,63	53,13	59,38	11,76
						53,13	57,50			
A2	160,16	41,15	40,11	0,586	2216,77	53,44	59,06	53,13	59,38	11,76
						52,50	60,31			
B1	160,4	41,58	40,5	0,599	2217,60	48,13	53,75	47,11	52,97	12,44
						46,56	53,75			
B2	160,56	39,88	40,87	0,589	2250,70	47,19	52,50	47,11	52,97	12,44
						46,56	51,88			
C1	160,15	41,37	40,12	0,583	2193,29	43,44	50,00	42,34	49,53	16,97
						41,56	49,69			
C2	160,23	41,7	40,05	0,588	2197,33	42,81	49,38	42,34	49,53	16,97
						41,56	49,06			
D1	159,55	40,4	40,47	0,591	2265,56	56,25	57,50	57,50	61,09	6,25
						56,88	60,63			
D2	160,01	40,21	41,24	0,591	2227,35	58,75	64,38	57,50	61,09	6,25
						58,13	61,88			
E1	160,04	41,65	40,55	0,593	2193,92	51,56	59,38	51,09	58,13	13,76
						50,63	58,75			
E2	160,02	40,27	40,27	0,585	2254,33	50,94	56,88	51,09	58,13	13,76
						51,25	57,50			

Wytrzymałość dla tych próbek jest wyższa po 28 dniach o 8,22%, natomiast po 56 dniach o 2,9%. Próbki w których popioły lotne były dodatkowym składnikiem osiągnęły większą wytrzymałość na ściskanie w porównaniu do próbek, w których taką samą ilością zastąpiono masę cementu. Największy przyrost wytrzymałości na ściskanie zanotowano dla betonu, w którym zamieniono 20% masy cementu popiołami i wynosi on niemal 17%. Najmniejszy przyrost badanej wytrzymałości zanotowano dla betonu z 15% dodatkiem popiołów i wynosi on jedynie 6,25%.

Mrozoodporność

Badanie mrozoodporności polega na określeniu spadku wytrzymałości na ściskanie próbki zamrażanej w stosunku do próbki nie zamrażanej. Według normy PN-88/B-06250 próbki po zamrażaniu nie powinny posiadać pęknięć, ubytek masy nie powinien przekraczać 5% masy próbki a obniżenie wytrzymałości na ściskanie próbki zamrażanej nie powinna być większa niż 20% w stosunku do próbki nie zamrażanej. Badanie wykonano na 10 próbkach (po jednej z każdej partii) po 56 dniach dojrzewania. Zważone, nasycone wodą be-

leczeni umieszczono w komorze ToRoPol (rys. 7). Próbki umieszczone w komorze poddano 25 cyklom. Jeden cykl badania polegał na zamrożeniu próbek w komorze w temperaturze -19 °C a następnie rozmrożeniu ich w wodzie o temperaturze 19 °C. Każdy z cykli trwał około dwóch godzin.

Wyniki badań próbek mrożonych zestawiono z wynikami badań wytrzymałości na ściskanie beleczek dojrzewających przez 56 dni w tabeli 6.

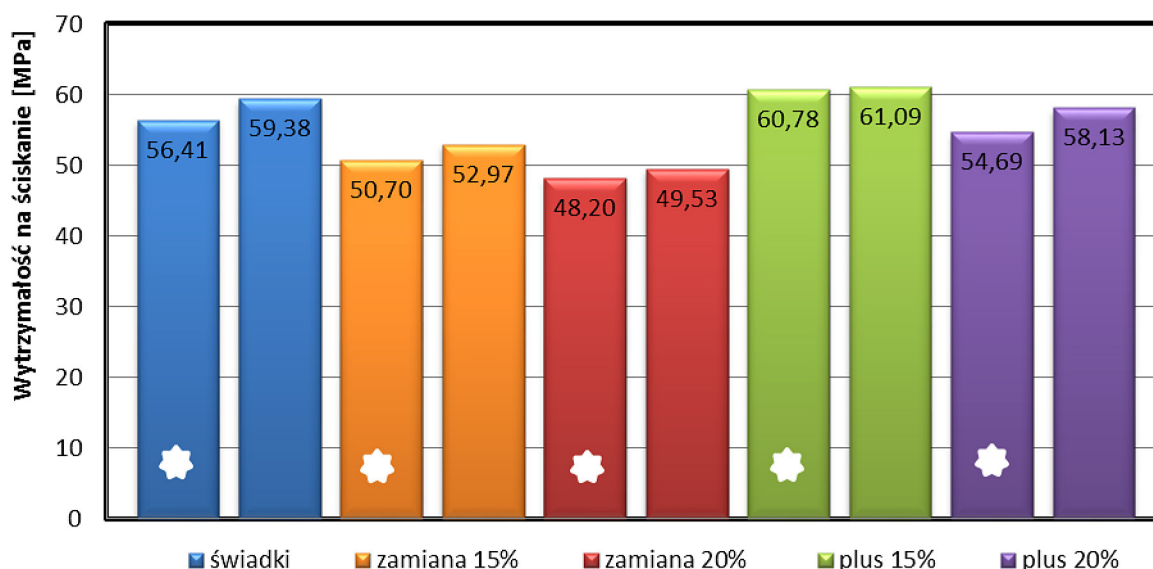
Na wykresie (rys. 8) przedstawiono średnią wytrzymałość na ściskanie próbek poddanych ba-



Rys. 7. Komora do badania mrozoodporności betonu
Fig. 7. Chamber for concrete freeze resistance tests

Tabela 6. Wyniki badań mrozoodporności betonu po 25 cyklach
Table 6. Results of concrete freeze resistance tests after 25 cycles

Partia	Masa przed mroz. [kg]	Masa po mroz. [kg]	Średni ubytek masy [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]				Średni spadek wyt. [%]
				próbki mrożone	próbki porównawcze	Śr. próbki mrożone	Śr. próbki porównawcze	
A1	0,585	0,576	0,94	55,00	60,63	56,41	59,38	5,00
A2	0,59	0,588		55,94	57,50			
				58,75	59,06			
				55,94	60,31			
B1	0,589	0,581	1,02	50,63	53,75	50,70	52,97	4,28
B2	0,579	0,575		50,94	53,75			
				49,69	52,50			
				51,56	51,88			
C1	0,591	0,585	1,02	47,50	50,00	48,20	49,53	2,68
C2	0,581	0,575		46,56	49,69			
				50,31	49,38			
				48,44	49,06			
D1	0,584	0,58	1,27	58,75	57,50	60,78	61,09	0,51
D2	0,596	0,585		59,06	60,63			
				63,13	64,38			
				62,19	61,88			
E1	0,595	0,584	1,85	53,75	59,38	54,69	58,13	5,91
E2	0,592	0,581		56,25	58,75			
				52,50	56,88			
				56,25	57,50			



Rys. 8. Zestawienie wytrzymałości na ściskanie próbek po badaniu mrozoodporności i próbek porównawczych
Fig. 8. Comparison of the compressive strength of the reference samples and the samples after the freeze resistance tests

daniu mrozoodporności (oznaczone gwiazdką) i próbek dojrzewających w wodzie. Bełeczki po zakończeniu badania nie miały widocznych spękań ani odprysków.

Ubytki mas próbek betonowych nie przekroczyły dopuszczalnego procentowego ubytku masy i zawierającym się między 0,94 a 1,85%. Największy ubytek masy zanotowano dla próbek

w których dodano 20% popiołów, najmniejszy dla próbek A1 i A2 czyli „świadków”. Wszystkie badane próbki nie przekroczyły również dopuszczalnego kryterium spadku wytrzymałości na ściskanie. Próbki charakteryzowały się niską utratą wytrzymałości zawierającym się między 0,51% a 5,91%. Najmniejszy spadek wytrzymałości zanotowano dla próbek partii D do których dodano 15% popiołu, największy dla próbek do których dodano 20% popiołu.

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że wszystkie badane betony są mrozoodporne w stopniu odpowiadającym 25 cykлом. Według normy PN-EN 206-1 jest to stopień F25.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku termicznego przekształcania oспowstaje problem zagospodarowania produktów spalania. Popioły lotne ze spalania osadów ściekowych zastosowano do produkcji betonu w oparciu o badania betonów drobnoziarnistych. Uzyskane wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Popioły lotne wpływają na wodozgodność i szczelność mieszanki betonowej. Dodając większą ilość popiołów lotnych do mieszanki należy zwiększać ilość wody by uzyskać zakładaną konsystencję. Zarówno przy dodawaniu popiołów lotnych i wymianie cementu nie udało się uzyskać zakładanej konsystencji.
2. Gęstość mieszanki nieznacznie wzrasta przy dodawaniu popiołów, natomiast przy wymianie cementu na popioły maleje w porównaniu do gęstości próbek kontrolnych.
3. Wartość wytrzymałości na zginanie rośnie z czasem dojrzewania betonu. Nie jest to jednak przyrost jednakowy dla wszystkich próbek. Największy przyrost wytrzymałości na zginanie zaobserwowano dla próbek kontrolnych, najmniejszy dla próbek do których dodano 20% popiołu.
4. Popiół z termicznego przekształcania wpływa na wzrost wytrzymałości na ściskanie w czasie (w porównaniu do zakładanej C20/30). Największa wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach dojrzewania uzyskały próbki betonu, w których dodano 15% popiołów, najmniejszą próbki z 20% zamiarą cementu na popiół.
5. Stwierdzono, że wszystkie badane betony są mrozoodporne.

BIBLIOGRAFIA

1. ACI Committee 232, Use of fly ash in concrete. ACI committee report 232. 2R-96. ACI, April 1996.
2. Bień J., Neczaj E., Worwąg M., Grosser A., Nowak D., Milczarek M., Janik M., 2011. Kierunki zagospodarowania osadów w Polsce po roku 2013. Inżynieria i Ochrona Środowiska, 4, 375–384.
3. Deja J., Antosiak B., 2012. Degree of progress of the fly ash reaction in alkali-activated fly-ash binders. Cement Wapno Beton, marzec-kwiecień.
4. Giergiczyński Z.: 2013. Popiół lotny w składzie cementu i betonu. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
5. Joshi R.C., Lohtia R.P. 1997. Fly ash in concrete: production properties and uses. V.M. Malhot (Ed.) Advances and Concrete Technology, Vol. 2, Gordon and Breach Science Publishers, Ottawa Ontario, Canada, p. 269.
6. Kępyś W., Pomykała R., Pietrzyk J., 2013. Właściwości popiołów lotnych z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych. Inżynieria Mineralna, styczeń-czerwiec.
7. Wesche K., 1991. Fly ash in concrete; properties and performance. K. Wesche (Ed.) Report of technical committee 67 – FAB-use of fly ash in building RILEM, E&FN SPON.
8. Krajowy Program Oczyszczania Ścieków Komunalnych (Aktualizacja 2010), pobrano XI 2012 r. z www.kzgw.gov.pl
9. Ochrona Środowiska 2011. Informacje i Opracowania Statystyczne. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa 2011.
10. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach (Dz.U. Nr 62 poz. 628 z późn. zm.).
11. PN-EN 12350-3:2001: Badania mieszanki betonowej - Część 3: Badanie konsystencji metodą Ve-be.
12. PN-EN 12350-6:2011 Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość.
13. PN-EN 12350-7:2001 Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
14. PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
15. PN-EN 12390-5:2011: Badania betonu - Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.
16. PN-EN 933-1:2000 Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewania.
17. PN-EN 206-1:2003 Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
18. Polska Norma PN-88/B-06250: Beton Zwykły.
19. Raport z badań nr 721/2014.